

Beschreibung

Strahlungsemittierender Dünnschicht-Halbleiterchip

- 5 Die vorliegende Erfindung betrifft strahlungsemittierende Dünnschicht-Halbleiterchips nach dem Oberbegriff von Patentanspruch 1 bzw. nach dem Oberbegriff von Patentanspruch 18 bzw. 34.
- 10 Ein strahlungsemittierender Dünnschicht-Halbleiterchip zeichnet sich bevorzugt durch eines oder mehrere, besonders bevorzugt alle der folgenden charakteristischen Merkmale aus:
- an einer zu einem Trägerelement hin gewandten ersten Hauptfläche einer strahlungserzeugenden Epitaxieschichtenfolge ist eine reflektierende Schicht aufgebracht oder
 - 15 ausgebildet, die zumindest einen Teil der in der Epitaxieschichtenfolge erzeugten elektromagnetischen Strahlung in diese zurückreflektiert;
 - die Epitaxieschichtenfolge weist eine Dicke im Bereich von
 - 20 $20\mu\text{m}$ oder weniger, insbesondere im Bereich von $10\mu\text{m}$ auf;
 - die Epitaxieschichtenfolge enthält mindestens eine Halbleiterschicht mit zumindest einer Fläche, die eine Durchmischungsstruktur aufweist, die im Idealfall zu einer annähernd ergodischen Verteilung des Lichtes in der Epitaxieschichtenfolge führt, d.h. sie weist ein möglichst ergodisch stochastisches Streuverhalten auf;
 - 25 - die Epitaxieschichtenfolge wird zunächst auf ein Aufwachssubstrat aufgewachsen, wobei nachfolgend die Epitaxieschichtenfolge von dem Aufwachssubstrat abgelöst und auf
 - 30 dem Trägerelement befestigt wird.

Ein Grundprinzip eines Dünnschicht-Leuchtdiodenchips ist beispielsweise in I. Schnitzer et al., Appl. Phys. Lett. 63 (16), 18. Oktober 1993, 2174 - 2176 beschrieben, deren Offenbarungsgehalt insofern hiermit durch Rückbezug aufgenommen wird.

35

Ein Dünnfilm-Leuchtdioden-Chip ist in guter Näherung ein Lambert'scher Oberflächenstrahler und eignet sich von daher besonders gut für die Anwendung in einem Scheinwerfer.

- 5 Herkömmliche strahlungsemittierende Halbleiterchips haben aus fertigungstechnischen Gründen häufig eine rechtwinklige Geometrie. Die Halbleiterchips bestehen im allgemeinen aus einer epitaktisch auf einem Trägersubstrat abgeschiedenen Mehrschichtstruktur mit einer aktiven, strahlungserzeugenden
- 10 Schicht. Das Trägersubstrat ist vorzugsweise elektrisch leitfähig, um einen vertikalen Stromfluss zu ermöglichen; außerdem ist es in vielen Fällen günstig, wenn das Trägersubstrat für die in der aktiven Schicht der Mehrschichtstruktur erzeugte Strahlung transparent ist. Allerdings steht eine hohe
- 15 Transparenz häufig in Widerspruch zu einer hohen elektrischen Leitfähigkeit des Materials für das Trägersubstrat. So ist zum Beispiel der für Leuchtdioden auf GaN-Basis verwendete Saphir für blaues Licht transparent, aber nicht elektrisch leitfähig. Siliziumcarbid als Trägersubstrat für GaN-
- 20 Leuchtdioden ist dagegen zwar leitfähig und transparent, aber die Transparenz nimmt mit zunehmender Leitfähigkeit ab, so dass die Eigenschaften des Halbleiterchips auch in diesem Fall nicht ideal sind.
- 25 Im allgemeinen dienen Halbleiterchips auf GaN-Basis vorwiegend der Strahlungserzeugung im blau-grünen Spektralbereich und weisen eine Mehrzahl von Schichten auf, die aus einem GaN-basierenden Material bestehen. Unter einem GaN-basierenden Material werden im Rahmen dieser Erfindung neben GaN
- 30 selbst auch von GaN abgeleitete oder mit GaN verwandte Materialien sowie darauf aufbauende ternäre oder quaternäre Mischkristalle verstanden. Mit anderen Worten bedeutet „auf GaN-Basis“ in diesem Zusammenhang, dass ein derart bezeichnetes Bauelement oder Teil eines Bauelements vorzugsweise
- 35 $\text{Al}_n\text{Ga}_m\text{In}_{1-n-m}\text{N}$ enthält, wobei $0 \leq n \leq 1$, $0 < m \leq 1$ und $n+m \leq 1$. Dabei muss dieses Material nicht zwingend eine mathematisch exakte Zusammensetzung nach obiger Formel aufweisen. Vielmehr

kann es ein oder mehrere Dotierstoffe sowie zusätzliche Bestandteile aufweisen, die die physikalischen Eigenschaften des Materials im Wesentlichen nicht ändern. Der Einfachheit halber beinhaltet obige Formel jedoch nur die wesentlichen Bestandteile des Kristallgitters (Al, Ga, In, N), auch wenn diese teilweise durch geringe Mengen weiterer Stoffe ersetzt sein können. Insbesondere zählen hierzu die Materialien GaN, AlN, InN, $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ und $\text{Al}_{1-x-y}\text{In}_x\text{Ga}_y\text{N}$ mit $0 < x < 1$, $0 < y < 1$ und $x + y \leq 1$.

Eine Möglichkeit zur Verringerung der Absorptionsverluste und damit zur Steigerung des externen Wirkungsgrades ist daher das Entfernen des Trägersubstrats in Verbindung mit geeigneten Spiegelschichten (Dünnschichtkonzept). Allerdings ist ein Halbleiterdünnschicht im wesentlichen eine planparallele Platte, deren Auskoppelleffizienz aufgrund der Geometrie gegenüber einer Standarddiode nicht erhöht ist. Insbesondere wenn für den Halbleiterchip bereits ein nur wenig absorbierendes Träger-substrat (zum Beispiel GaN auf SiC) verwendet wurde, ist die Steigerung des externen Wirkungsgrades des Dünnschicht-Halbleiterchips zu gering, um den erhöhten technischen Aufwand der Entfernung des Trägersubstrats zu rechtfertigen.

Zur Erläuterung der Problematik der Strahlungsauskopplung zeigt Figur 8 schematisch einen Halbleiterchip mit den Kegeln der Strahlungsauskopplung. Strahlung kann aus dem Halbleiterchip nur aus einem Kegel mit einem Öffnungswinkel von $\theta = \sin^{-1}(n_{\text{ext}}/n_{\text{int}})$ ausgekoppelt werden, wobei n_{int} den Brechungsindex des Halbleitermaterials und n_{ext} den Brechungsindex der Umgebung bezeichnet. Für einen GaN-Halbleiter ($n_{\text{int}} = 2,5$) beträgt der Auskoppelwinkel θ gegen Luft ($n_{\text{ext}} = 1$) 23° und gegen einen Kunststoffverguss ($n_{\text{ext}} = 1,5$) 37° . Im Halbleiterchip erzeugte Strahlung, die nicht innerhalb eines Kegels auf die Grenzflächen trifft, wird schließlich reabsorbiert und in Wärme umgewandelt. Der Auskoppelkegel ist für GaN-Systeme im Vergleich zu GaAs-Systemen

($n_{\text{int}} = 3,5$) zwar groß, führt aber dennoch zu unerwünscht großen Strahlungsverlusten.

5 Diese Verhältnisse ändern sich auch nicht wesentlich bei veränderten Schichtdicken. Allerdings ist für den über die Oberseite ausgekoppelten Strahl die Dünnschichtgeometrie günstig, da aufgrund des kurzen Weges im Halbleiter die Absorption gering ist; für den seitlich ausgekoppelten Strahl kann dagegen die Effizienz aufgrund der Mehrfachreflexionen im Halbleiter so-
10 gar geringer sein.

Es gibt deshalb bereits verschiedene Ansätze, den externen Wirkungsgrad von Halbleiterchips durch veränderte Geometrien zu erhöhen. Hier ist insbesondere eine sogenannte Mikrostrukturierung der gesamten Mehrschichtstruktur zu nennen,
15 die aufgrund der größeren Gesamtfläche der Seitenflächen der Mehrschichtstruktur zu einer verstärkten seitlichen Strahlungsauskopplung führt. Zusätzlich können die Seitenflächen der so erzeugten einzelnen Mehrschichtstrukturen angeschrägt werden. Beispiele für derartige Halbleiterchips sind in DE-A-
20 198 07 758, EP-A-0 905 797 oder JP-A-08-288543 offenbart.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Strahlungsauskopplung ist in den Figuren 3 und 5 der DE-A-199 11 717 gezeigt.
25 Hier sind der Mehrschichtstruktur mit der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht einzelne Strahlungsauskoppelemente in Form von Kugelsegmenten oder Kegelstümpfen zugeordnet, die beispielsweise mittels entsprechendem Ätzen von aufgewachsenen Schichten ausgebildet werden.

30

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen strahlungsemitierenden Dünnschicht-Halbleiterchip, insbesondere auf GaN-Basis, bereitzustellen, das einen verbesserten externen Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung aufweist.

35

Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe durch einen Halbleiterchip mit den Merkmalen

von Patentanspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen dieses Halbleiterchips sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

5 Der strahlungsemittierende Dünnschicht-Halbleiterchip gemäß der Erfindung weist eine Mehrschichtstruktur auf, die eine aktive, strahlungserzeugende Schicht enthält und eine erste Hauptfläche und eine der ersten Hauptfläche abgewandte zweite Hauptfläche zum Auskoppeln der in der aktiven, strahlungser-
10 zeugenden Schicht erzeugten Strahlung aufweist. Bei der Erfindung enthält die Mehrschichtstruktur bevorzugt ein Material auf GaN-Basis. Es können für die Mehrschichtstruktur aber auch andere Verbindungshalbleiter aus dem III-V Halbleiter-materialsystem, wie Phosphid- oder Arsenid-Verbindungs-
15 halbleiter (d.h. $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{P}$ oder $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{As}$, wobei $0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$ und $a+b \leq 1$), oder aus dem II-VI Halbleiter-materialsystem verwendet werden. Weiterhin ist die erste Hauptfläche der Mehrschichtstruktur mit einer reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche gekoppelt, und der an die zweite
20 Hauptfläche der Mehrschichtstruktur angrenzende Bereich der Mehrschichtstruktur ist ein- oder zweidimensional strukturiert.

Die Erhöhung des externen Wirkungsgrades der Strahlungsaus-
25 kopplung beruht auf der Brechung der rechtwinkligen Geometrie des Dünnschicht-Halbleiterchips durch eine Strukturierung des Halbleiterdünnschicht selbst. Die Steigerung des Wirkungsgrades wird im Rahmen der nachfolgenden detaillierten Beschreibung mit Hilfe von Untersuchungsergebnissen belegt.

30 Vorzugsweise weist der an die zweite Hauptfläche der Mehrschichtstruktur angrenzende strukturierte Bereich der Mehrschichtstruktur konvexe Erhebungen in Form von Pyramidenstümpfen, Kegelstümpfen, Kegeln oder Kugelsegmenten (zweidi-
35 mensionale Strukturierung) bzw. mit einer trapezoiden, dreieckigen oder Kreissegment-Querschnittsform (eindimensionale Strukturierung) auf.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel liegt der Neigungswinkel der Erhebungen zwischen etwa 30° und etwa 70° , besonders bevorzugt zwischen etwa 40° und etwa 50° . Der Neigungswinkel ist der Winkel, den eine Seitenfläche der Erhebung mit dem Lot zur Haupterstreckungsebene der Mehrschichtstruktur schließt. Außerdem ist die Höhe der Erhebungen wenigstens so groß, vorzugsweise etwa doppelt so groß wie der Abstand zwischen dem strukturierten Bereich und der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht. Die Zellengröße einer Erhebung, d. h. die laterale Abmessung einer Erhebung, ist von der Mitte einer Erhebung bis zur Mitte einer benachbarten Erhebung gemessen, wenn die Erhebungen dicht unmittelbar nebeneinander angeordnet sind. Die Zellengröße der Erhebungen wird höchstens etwa fünfmal, vorzugsweise höchstens etwa dreimal so groß wie die Höhe der Erhebungen gewählt.

Die mit der ersten Hauptfläche der Mehrschichtstruktur gekoppelte Schicht bzw. Grenzfläche weist vorteilhafterweise einen Reflexionsgrad von mindestens 70%, besser von mindestens 85% auf.

Die Mehrschichtstruktur kann entweder mit ihrer ersten Hauptfläche direkt oder über eine reflektierende Schicht auf einem Trägersubstrat aufgebracht sein, wobei die reflektierende Schicht bzw. das Trägersubstrat zugleich als elektrische Kontaktschicht des Halbleiterchips dient.

Als Ausgleich für eine begrenzte Querleitfähigkeit der dünnen Halbleiterschicht kann auf der zweiten Hauptfläche der Mehrschichtstruktur eine elektrisch leitfähige, transparente Schicht aufgebracht sein.

Zum Schutz gegen externe Einflüsse kann auf der zweiten Hauptfläche der Mehrschichtstruktur eine transparente Schutz- bzw. Vergütungsschicht aufgebracht sein.

Gemäß einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe durch einen Halbleiterchip mit den Merkmalen von Patentanspruch 19 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen dieses Halbleiterchips sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Dieser strahlungsemittierende Dünnschicht-Halbleiterchip gemäß der Erfindung weist ebenfalls eine Mehrschichtstruktur auf, die eine aktive, strahlungserzeugende Schicht enthält und eine erste Hauptfläche und eine der ersten Hauptfläche abgewandte zweite Hauptfläche zum Auskoppeln der in der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht erzeugten Strahlung aufweist. Die erste Hauptfläche der Mehrschichtstruktur ist wiederum mit einer reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche gekoppelt. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Halbleiterchip ist hier zwischen der ersten Hauptfläche der Mehrschichtstruktur und der reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche eine transparente Schicht vorgesehen, welche ein- oder zweidimensional strukturiert ist.

Die Strukturierung dieser transparenten Schicht zwischen der Mehrschichtstruktur und der reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche bewirkt, wie die Strukturierung der Mehrschichtstruktur selbst, eine Erhöhung des externen Wirkungsgrads der Strahlungsauskopplung.

Vorzugsweise ist die transparente Schicht leitfähig, um die begrenzte Querleitfähigkeit einer dünnen Mehrschichtstruktur auszugleichen.

Die transparente Schicht zwischen der ersten Hauptfläche der Mehrschichtstruktur und der reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche weist konvexe Erhebungen vorzugsweise in Form von Pyramidenstümpfen oder Kegelstümpfen (zweidimensionale Strukturierung) bzw. eine trapezoide Querschnittsform (eindimensionale Strukturierung) auf.

In einer bevorzugten Ausführungsform weisen diese Erhebungen einen Neigungswinkel zwischen etwa 30° und etwa 70°, bevorzugt zwischen etwa 40° und etwa 50° auf. Der Neigungswinkel ist der Winkel, den eine Seitenfläche der Erhebung mit dem Lot zur Haupterstreckungsebene der Mehrschichtstruktur schließt. Dabei ist die Höhe der Erhebungen wenigstens so groß, vorzugsweise etwa doppelt so groß wie der Abstand zwischen dem strukturierten Bereich der Mehrschichtstruktur und der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht gewählt, und die Zellengröße der Erhebungen beträgt höchstens das Fünffache, vorzugsweise höchstens das Dreifache der Höhe der Erhebungen.

Die mit der ersten Hauptfläche der Mehrschichtstruktur gekoppelte Schicht bzw. Grenzfläche weist bevorzugt einen Reflexionsgrad von mindestens 70%, besonders bevorzugt von wenigstens 85% auf.

Die reflektierende Schicht kann auf einem Trägersubstrat aufgebracht sein oder die reflektierende Grenzfläche ist durch ein Trägersubstrat gebildet, wobei die reflektierende Schicht bzw. das Trägersubstrat zugleich als Kontaktschicht des Halbleiterchips dient.

Gemäß einem dritten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe durch einen Halbleiterchip mit den Merkmalen von Patentanspruch 34 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen dieses Halbleiterchips sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Die obigen sowie weitere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden anhand der folgenden detaillierten Beschreibung verschiedener bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen näher beschrieben. Darin zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels eines Halbleiterchips gemäß der vorliegenden Erfindung im Schnitt;

5 Figuren 2a) bis c) schematische Darstellungen zur Erläuterung des optimalen Neigungswinkels der Erhebungen des Halbleiterchips von Figur 1;

10 Figuren 3a) bis e) Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Erläuterung verschiedener optimaler Parameter der Erhebungen des Halbleiterchips von Figur 1;

Figur 4 eine schematische Darstellung einer Abwandlung des ersten Ausführungsbeispiels von Figur 1;

15

Figur 5 eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Halbleiterchips gemäß der vorliegenden Erfindung im Schnitt;

20 Figur 6 eine schematische Darstellung einer weiteren Abwandlung des ersten Ausführungsbeispiels von Figur 1;

25 Figur 7 eine schematische Darstellung einer noch weiteren Abwandlung des ersten Ausführungsbeispiels von Figur 1; und

30 Figur 8 eine stark schematisierte Darstellung bezüglich der Strahlungsauskopplung herkömmlicher Halbleiterchips.

In Figur 1 ist ein erstes bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines Dünnschicht-Halbleiterchips gemäß der vorliegenden Erfindung dargestellt. Ein Hauptbestandteil des Halbleiterchips 10 ist eine Mehrschichtstruktur 12 bevorzugt auf GaN-Basis, die eine aktive, strahlungserzeugende Schicht 14 enthält. Die Mehrschichtstruktur 12 ist in üblicher Weise epitaktisch ge-

wachsen und enthält hier bekanntermaßen eine Mehrzahl von GaN-basierenden Schichten.

Die Mehrschichtstruktur 12 weist eine erste Hauptfläche 16
5 und eine der ersten Hauptfläche abgewandte zweite Hauptfläche
18 auf, wobei die in der aktiven, strahlungserzeugenden
Schicht 14 erzeugte Strahlung letztlich durch die zweite
Hauptfläche 18 aus dem Halbleiterchip 10 ausgekoppelt wird.
In dem gezeigten Ausführungsbeispiel ist die aktive Schicht
10 14 näher an der ersten Hauptfläche 16 als an der zweiten
Hauptfläche 18 der Mehrschichtstruktur 12 positioniert; die
vorliegende Erfindung ist aber keineswegs hierauf beschränkt,
vielmehr kann die aktive Schicht 14 auch mittig in der Mehr-
schichtstruktur 12 oder näher an der zweiten Hauptfläche 18
15 ausgebildet sein. Die in Figur 1 gewählte Position ist aller-
dings für die erfindungsgemäße, nachfolgend beschriebene
Strukturierung der Mehrschichtstruktur vorteilhaft, da für
die Strukturierung ein dickerer Anteil der Mehrschicht-
struktur 12 zur Verfügung steht.

20

Die Mehrschichtstruktur 12 ist über eine reflektierende
Schicht 28, die vorzugsweise aus einem elektrisch leitfähigen
Material besteht, auf einem Trägersubstrat 30 zum Beispiel
aus Saphir, Si oder SiC aufgebracht. Die reflektierende
25 Schicht 28 kann beispielsweise als metallische Kontaktschicht
aus Ag, Al oder einer Ag- oder Al-Legierung oder alternativ
als dielektrische Verspiegelung aus mehreren dielektrischen
Schichten ausgebildet sein. In einer alternativen Ausfüh-
rungsform kann die Mehrschichtstruktur 12 auch direkt auf dem
30 Trägersubstrat 30 aufgebracht sein, wobei in diesem Fall das
Material des Trägersubstrats 30 derart ausgewählt ist, dass
die Grenzfläche zwischen Mehrschichtstruktur 12 und Träger-
substrat 30 reflektierend ist.

35 Der Bereich der Mehrschichtstruktur 12 oberhalb der aktiven
Schicht 12 lässt sich, wie deutlich in Figur 1 zu erkennen,
im wesentlichen in einen nicht strukturierten Bereich 20, der

an die aktive Schicht 14 angrenzt, und einen strukturierten Bereich 22, der an die zweite Hauptfläche 18 angrenzt unterteilen. Die Strukturierung der Mehrschichtstruktur 12 erfolgt beispielsweise mittels üblicher Lithographie- und/oder Ätzverfahren an den epitaktisch aufgewachsenen Halbleiterschichten, durch welche nutartige Ausnehmungen bzw. Vertiefungen 24 ausgebildet werden, zwischen denen entsprechende Erhebungen 26 zurückbleiben.

- Die Strukturierung der Mehrschichtstruktur 12 kann entweder eindimensional, d.h. mit Vertiefungen 24 in nur einer Koordinatenrichtung der Ebene der zweiten Hauptfläche 18, oder zweidimensional, d.h. mit Vertiefungen 24 in zwei vorzugsweise senkrecht zueinander verlaufenden Koordinatenrichtungen der Ebene der zweiten Hauptfläche 18, ausgebildet sein. Die zwischen den Vertiefungen 24 entstehenden Erhebungen 26 sind üblicherweise konvex geformt. Dabei sind eindimensionale Strukturierungen beispielsweise mit einer trapezoiden (siehe Figur 1), dreieckigen, Kreissegment- oder Halbkugel-Querschnittsform und zweidimensionale Strukturierungen entsprechend in Form von Pyramidenstümpfen, Kegelstümpfen, Kegeln, Kugelsegmenten oder Halbkugeln ausgebildet.

In Figur 1 sind Erhebungen 26 in Form von Pyramidenstümpfen dargestellt. Wie in Figur 1 gezeigt, schließt eine Seitenfläche der Erhebung 26 einen Neigungswinkel β mit dem Lot zur Haupterstreckungsebene der Mehrschichtstruktur. Diese Definition ist entsprechend auch auf andere Formen der Erhebungen 26 übertragbar. Aufgrund der konvex geformten Erhebungen 26 wird die in der aktiven Schicht 14 erzeugte Strahlung gegebenenfalls mehrfach an den Grenzflächen der Mehrschichtstruktur 12 reflektiert bis die Strahlung schließlich in dem von den Brechungsindizes der Materialien und der Umgebung abhängigen Strahlungsauskopplungskegel auf die zweite Hauptfläche 18 oder den Boden der Vertiefungen 24 trifft und somit auskoppeln kann.

Wie in den Figuren 2a) bis c) veranschaulicht, hängt der Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung von dem Neigungswinkel β der Erhebungen 26 ab. Sehr steile Flanken, wie in Figur 2a) erhöhen die Oberfläche des Bauteils und sind damit für die Strahlungsauskopplung günstig, aber sie sind mit einer Verminderung der Anzahl der aufgrund der Totalreflexion nicht auskoppelbaren Moden bestenfalls nur geringfügig verbunden. Ebenfalls sollten die Flanken der Erhebungen 26 nicht zu flach gewählt sein, wie in Figur 2c) dargestellt, da in diesem Fall die Abweichung von der planparallelen Platte nur gering ist und bis zur Auskopplung eine große Anzahl von mehrfachreflexionen erfolgen muss, was aufgrund der dabei unvermeidlichen Dämpfung negativ ist.

Am günstigsten ist ein in Figur 2b) dargestellter mittlerer Winkelbereich des Neigungswinkels β der Erhebungen 26. Bei dieser Wahl des Neigungswinkels β kann die Strahlung, die von einer Facette der Erhebung 26 totalreflektiert wird, beim Auftreffen auf die nächste Facette der Erhebung 26 innerhalb des Strahlungsauskopplungskegels ausgekoppelt werden, wodurch auch die Anzahl der Mehrfachreflexionen in der Mehrschichtstruktur gering gehalten wird.

Diese Abschätzung wird auch durch Untersuchungen bestätigt, deren Ergebnisse in Figur 3a) gezeigt sind. Auf der Abszisse ist hierbei der Neigungswinkel β der pyramidenstumpfförmigen Erhebungen 26 aufgetragen, und auf der Ordinate ist der externe Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung aufgetragen. Man erkennt deutlich, dass der beste Wirkungsgrad in einem Bereich des Neigungswinkels β zwischen etwa 30° und etwa 70° , genauer zwischen etwa 40° und etwa 50° erreicht wird. Für Werte des Neigungswinkels β über 70° und unter 30° fällt der Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung deutlich ab. Ein Neigungswinkel β im Bereich um etwa 45° ist somit zu bevorzugen.

Ein weiterer Parameter, der den externen Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung beeinflusst, ist die Höhe h_1 der Erhe-

bungen 26. Zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades sollte die Höhe h_1 der Erhebungen 26 mindestens so groß wie die Höhe h_2 des an die aktive Schicht 14 angrenzenden nicht strukturierten Bereichs 20 gewählt werden. Bevorzugt werden die Erhebungen 26 doppelt so hoch wie der nicht strukturierte Bereich 20 ausgebildet; eine weitere Erhöhung der Erhebungen 26 bringt keine (oder nur geringfügige) weitere Steigerung der Strahlungsauskopplung.

Dies wird durch die in Figur 3b) dargestellten Untersuchungsergebnisse bestätigt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen für einen nicht strukturierten Bereich 20 mit einer Höhe h_2 von etwa $2\text{ }\mu\text{m}$ den externen Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung über der Höhe h_1 der Erhebungen 26. Bei einer Höhe h_1 der Erhebungen 26 unterhalb von $2\text{ }\mu\text{m}$, d.h. kleiner als die Höhe h_2 des nicht strukturierten Bereichs 20, erfolgt nur eine ungenügende Strahlungsauskopplung, während bei Höhen h_1 der Erhebungen 26 größer als etwa $4\text{ }\mu\text{m}$ keine wesentliche Steigerung des Wirkungsgrades mehr erkennbar ist.

Ferner sind auch Erhebungen 26 mit relativ kleinen lateralen Abmessungen zu bevorzugen. Wie die Untersuchungsergebnisse von Figur 3c) zeigen, ist eine Zellengröße d der Erhebungen von höchstens etwa vier- bis fünfmal der Höhe h_1 der Erhebungen 26, vorzugsweise nur von etwa ein- bis dreimal der Höhe h_1 der Erhebungen für einen guten Wirkungsgrad vorteilhaft.

Da das Konzept der Dünnschicht-Halbleiterchips u.a. auch auf Mehrfachreflexionen beruht, hat das Reflexionsvermögen der Bauteilrückseite, d.h. der reflektierenden Schicht 28 oder der reflektierenden Grenzfläche ebenfalls einen Einfluss auf den externen Wirkungsgrad des Halbleiterchips. Man erkennt in dem Diagramm von Figur 3d), dass bei einem herkömmlichen planaren Dünnschicht der Wirkungsgrad der Strahlungsauskopplung nur wenig von dem Reflexionsvermögen der rückseitigen Kontaktschicht abhängt (untere Kurve in Figur 3d)). Für eine strukturierte Mehrschichtstruktur 12 wie in Figur 1 hängt der

Wirkungsgrad jedoch stark von dem Reflexionsvermögen der reflektierenden Schicht 28 bzw. Grenzfläche ab (obere Kurve in Figur 3d)) und sollte möglichst über 70%, vorzugsweise über 85% gewählt werden.

5

In Figur 4 ist eine Abwandlung des Halbleiterchips von Figur 1 dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Ausführungsformen besteht darin, dass auf der strukturierten zweiten Hauptfläche 18 der Mehrschichtstruktur 12 eine Schutz- bzw. Vergütungsschicht 32 vorgesehen ist. Diese Schutzschicht 32 soll einerseits den Halbleiter vor externen Einflüssen schützen, andererseits kann die Schutzschicht 32 bei geeigneter Wahl von Brechungsindex und Dicke als Entspiegelungsschicht wirken.

15

Als weitere Variante des ersten Ausführungsbeispiels des Halbleiterchips kann auf der strukturierten zweiten Hauptfläche 18 der Mehrschichtstruktur 12 eine transparente, leitfähige Schicht mit möglichst kleinem Übergangswiderstand zum Halbleiter vorgesehen sein. Durch eine solche transparente, leitfähige Schicht kann man den Nachteil, dass die Strukturierung der Mehrschichtstruktur zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Strahlungsauskopplung gleichzeitig eine Verringerung deren Querleitfähigkeit bewirkt, ausgleichen. Es wird eine optimale Stromzuführung zu allen Bereichen des Halbleiterchips erzielt, ohne durch Metallkontakte auf der Mehrschichtstruktur deren Strahlungsauskopplung zu beeinträchtigen.

30

Die transparente, leitfähige Schicht besteht zum Beispiel aus ZnO, SnO, InO, CdO, GaO oder einer Kombination davon. Diese Materialien zeigen eine n- oder p-Leitfähigkeit und können mittels Sputterverfahren, CVD-Verfahren oder Aufdampfen abgeschieden werden.

35

Ein zweites Ausführungsbeispiel eines strahlungsemittierenden Halbleiterchips gemäß der Erfindung ist in Figur 5 dargestellt.

5 Der Dünnschicht-Halbleiterchip 10 weist eine Mehrschichtstruktur 12 bevorzugt auf GaN-Basis mit einer aktiven, strahlungserzeugenden Schicht 14 auf. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen ersten Ausführungsbeispiel ist hier aber nicht die zweite Hauptfläche 18 der Mehrschichtstruktur 12, durch welche die in der aktiven Schicht 14 erzeugte Strahlung schließlich ausgekoppelt wird, strukturiert, sondern zwischen der ersten Hauptfläche 16 und der reflektierenden Schicht oder Grenzfläche auf dem Trägersubstrat 30 ist eine transparente Schicht 34 vorgesehen, die zur Steigerung der Strahlungsauskopplung strukturiert ist. Dieser Aufbau ist insbesondere dann vorzuziehen, wenn die den Halbleiter 12 gut kontaktierenden Metalle nicht besonders hoch reflektierend sind und deshalb besser reflektierende Metalle wie Ag verwendet werden sollen, die aufgrund einer hohen Migration den Halbleiter verunreinigen können.

Zum Ausgleich einer geringeren Querleitfähigkeit des Dünnschicht-Halbleiters ist es von Vorteil, die transparente Schicht 34 aus einem leitfähigen Material auszubilden.

25

Die Strukturierung entspricht im wesentlichen der oben anhand des ersten Ausführungsbeispiels beschriebenen. Als konvexe Erhebungen 26' kommen hier allerdings in erster Linie solche in Form von Pyramidenstümpfen oder Kegelstümpfen bzw. solche mit trapezoider Querschnittsform in Frage. Die oben anhand er Figur 3 erläuterten Parameter der Strukturierung können auf die Erhebungen 26' dieses zweiten Ausführungsbeispiels übertragen werden. Hierbei ist die nicht strukturierte Schicht 35 zwischen der aktiven Schicht 14 der Mehrschichtstruktur 12 und der transparenten Schicht 34 als Bezugsgröße heranzuziehen.

35

Eine weitere alternative Ausführungsform des Halbleiterchips von Figur 1 ist in Figur 6 gezeigt. Bei diesem Halbleiterchip 10 ist nicht die Mehrschichtstruktur 12 selbst strukturiert, sondern eine auf der zweiten Hauptfläche 18 der Mehrschichtstruktur 12 aufgebrachte Vergütungsschicht 32 ist mit entsprechenden konvexen Erhebungen 36 versehen.

Typische Vergütungsschichten 32, zum Beispiel aus SiO_2 oder SiN_x , haben einen Brechungsindex von unter 2, so dass die strahlung an der Grenzfläche zwischen Halbleiter 12 und Vergütungsschicht 32 teilweise totalreflektiert wird. Wie das Diagramm von Figur 3e) zeigt, nimmt die Effektivität der strukturierten Vergütungsschicht 32 mit zunehmender Abweichung des Brechungsindex von dem des Halbleiters mit 2,5 deutlich ab. Eine strukturierte Vergütungsschicht mit niedrigem Brechungsindex kann aber trotzdem vorteilhaft sein, da auch eine totalreflektierte Welle bis etwa zu einer Tiefe der halben Wellenlänge in das Material mit kleinerem Brechungsindex eindringt, dabei allerdings exponentiell abklingt. Die Höhe der strukturierten Vergütungsschicht sollte deshalb nicht mehr als wenige 100 nm betragen und die lateralen Abmessungen liegen im Bereich von Mikrometern.

Wenn die lateralen Abmessungen der Strukturen 36 der Vergütungsschicht 32 in den Bereich der Wellenlänge der auszukoppelnden Strahlung reduziert werden, wird eine auftreffende Welle an einer solchen Mikrostruktur 36 gestreut, wodurch der Strahl in einen größeren Winkelbereich aufgefächert wird.

Schließlich ist in Figur 7 eine weitere Abwandlung des Halbleiterchips von Figur 1 gezeigt. Auf der in diesem Fall nicht strukturierten Mehrschichtstruktur 12 ist eine transparente, leitfähige Schicht 38 aus zum Beispiel ZnO , SnO , InO , CdO , GaO oder einer Kombination davon aufgebracht. Diese transparente, leitfähige Schicht 38 ist analog dem ersten Ausführungsbeispiel von Figur 1 strukturiert, wobei in Figur 7 eine

eindimensionale Strukturierung mit Erhebungen mit einer trapezoiden Querschnittsform dargestellt sind.

Der Übergangswiderstand zwischen der transparenten, leitfähigen Schicht 38 und dem Halbleiter 12 sollte möglichst gering sein. Ist dies nicht der Fall, kann zwischen der Schicht 38 und der Mehrschichtstruktur 12 eine (nicht dargestellte) Metallschicht erforderlich sein, die vorzugsweise sehr dünn und damit semitransparent oder unterbrochen ausgebildet ist.

Der Schutzzumfang der Erfindung ist nicht durch die Beschreibung der Erfindung anhand der Ausführungsbeispiele beschränkt. Vielmehr umfasst die Erfindung jedes neue Merkmal sowie jede Kombination von Merkmalen, was insbesondere jede Kombination von Merkmalen in den Patentansprüchen beinhaltet, auch wenn diese Kombination nicht explizit in den Patentansprüchen angegeben ist.

Patentansprüche

1. Strahlungsemittierender Dünnschicht-Halbleiterchip mit
einer epitaktischen Mehrschichtstruktur (12), die eine
5 aktive, strahlungserzeugende Schicht (14) enthält und ei-
ne erste Hauptfläche (16) und eine der ersten Hauptfläche
abgewandte zweite Hauptfläche (18) zum Auskoppeln der in
der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht erzeugten
Strahlung aufweist,
10 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die erste Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12)
mit einer reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche gekop-
pelt ist, und der an die zweite Hauptfläche (18) der
Mehrschichtstruktur angrenzende Bereich (22) der Mehr-
15 schichtstruktur ein- oder zweidimensional strukturiert
ist.
2. Halbleiterchip nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
20 ein Trägerelement an die erste Hauptfläche (16) gekoppelt
ist und die reflektierende Schicht bzw. Grenzfläche zwi-
schen dem Trägerelement und der Mehrschichtstruktur ange-
ordnet ist.
- 25 3. Halbleiterchip nach Anspruch 1 oder 2,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die der an die zweite Hauptfläche (18) der Mehrschicht-
struktur (12) angrenzende Bereich (22) der Mehrschicht-
struktur konvexe Erhebungen (26) aufweist.
30
4. Halbleiterchip nach Anspruch 3,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die Erhebungen (26) die Form von Pyramidenstümpfen oder
Kegelstümpfen bzw. eine trapezoide Querschnittsform auf-
35 weisen.

5. Halbleiterchip nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Erhebungen (26) die Form von Kegeln bzw. eine dreieckige Querschnittsform aufweisen.
- 5 6. Halbleiterchip nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Erhebungen (26) die Form von Kugelsegmenten bzw. eine Kreissegment-Querschnittsform aufweisen.
- 10 7. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 3 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Erhebungen (26) einen Neigungswinkel (β) zwischen etwa 30° und etwa 70° aufweisen.
- 15 8. Halbleiterchip nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Erhebungen (26) einen Neigungswinkel (β) zwischen etwa 40° und etwa 50° aufweisen.
- 20 9. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 3 bis 8,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Höhe (h1) der Erhebungen (26) wenigstens so groß wie
der Abstand (h2) zwischen einem nicht strukturierten Bereich (20) der Mehrschichtstruktur (12) und der aktiven,
25 strahlungserzeugenden Schicht (14) ist.
10. Halbleiterchip nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
30 die Höhe (h1) der Erhebungen (26) etwa doppelt so groß
wie der Abstand (h2) zwischen dem nicht strukturierten Bereich (20) der Mehrschichtstruktur und der aktiven,
strahlungserzeugenden Schicht ist.
- 35 11. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 3 bis 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
eine Zellengröße (d) der Erhebungen (26) höchstens etwa

20

fünfmal so groß wie die Höhe (h_1) der Erhebungen ist.

12. Halbleiterchip nach Anspruch 11,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
5 die Zellengröße (d) der Erhebungen höchstens etwa dreimal
so groß wie die Höhe (h_1) der Erhebungen ist.

13. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 1 bis 12,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
10 die mit der ersten Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12) gekoppelte Schicht (28) bzw. Grenzfläche einen
Reflexionsgrad von mindestens 70% aufweist.

14. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 1 bis 12,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
15 die mit der ersten Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12) gekoppelte Schicht (28) bzw. Grenzfläche einen
Reflexionsgrad von mindestens 85% aufweist.

15. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 1 bis 14,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
20 die Mehrschichtstruktur (12) mit ihrer ersten Hauptfläche
(16) direkt oder über eine reflektierende Schicht (28)
auf einem Trägersubstrat (30) aufgebracht ist.

16. Halbleiterchip nach Anspruch 15,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
25 die reflektierende Schicht bzw. das Trägersubstrat zu-
gleich als Kontaktschicht des Halbleiterchips dient.

17. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 1 bis 16,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
30 auf der zweiten Hauptfläche (18) der Mehrschichtstruktur
(12) eine leitfähige, transparente Schicht aufgebracht
ist.

18. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 1 bis 17,
dadurch gekennzeichnet, dass
auf der zweiten Hauptfläche (18) der Mehrschichtstruktur
(12) eine transparente Schutzschicht (32) aufgebracht
5 ist.

19. Strahlungsemittierendes Dünnschicht-Halbleiterchip mit
einer epitaktischen Mehrschichtstruktur (12), die eine
aktive, strahlungserzeugende Schicht (14) enthält und ei-
10 ne erste Hauptfläche (16) und eine der ersten Hauptfläche
abgewandte zweite Hauptfläche (18) zum Auskoppeln der in
der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht erzeugten
Strahlung aufweist,
dadurch gekennzeichnet, dass
15 die erste Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12)
mit einer reflektierenden Schicht (28) bzw. Grenzfläche
gekoppelt ist, und zwischen der ersten Hauptfläche (16)
der Mehrschichtstruktur und der reflektierenden Schicht
bzw. Grenzfläche eine transparente Schicht (34) vorgese-
20 hen ist, welche ein- oder zweidimensional strukturiert
ist.

20. Halbleiterchip nach Anspruch 19,
dadurch gekennzeichnet, dass
25 die transparente Schicht (34) leitfähig ist.

21. Halbleiterchip nach Anspruch 19 oder 20,
dadurch gekennzeichnet, dass
die transparente Schicht (34) zwischen der ersten
30 Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12) und der re-
flektierenden Schicht (28) bzw. Grenzfläche konvexe Erhe-
bungen (26') aufweist.

22. Halbleiterchip nach Anspruch 21,
35 dadurch gekennzeichnet, dass
die Erhebungen (26') die Form von Pyramidenstümpfen oder
Kegelstümpfen bzw. eine trapezoide Querschnittsform auf-

weisen.

23. Halbleiterchip nach Anspruch 21 oder 22,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
5 die Erhebungen (26') einen Neigungswinkel (β) zwischen
etwa 30° und etwa 70° aufweisen.
24. Halbleiterchip nach Anspruch 21 oder 22,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
10 die Erhebungen (26') einen Neigungswinkel (β) zwischen
etwa 40° und etwa 50° aufweisen.
25. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 21 bis 24,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
15 die Höhe (h1) der Erhebungen (26') wenigstens so groß wie
die Höhe (h2) eines nicht strukturierten Bereichs (35)
der Mehrschichtstruktur (12) zwischen der aktiven, strah-
lungserzeugenden Schicht (14) und den Erhebungen ist.
- 20 26. Halbleiterchip nach Anspruch 25,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die Höhe (h1) der Erhebungen (26') etwa doppelt so groß
wie die Höhe (h2) des nicht strukturierten Bereichs (35)
der Mehrschichtstruktur zwischen der aktiven, strahlungs-
25 erzeugenden Schicht und den Erhebungen ist.
27. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 21 bis 26,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
eine Zellengröße (d) der Erhebungen (26') höchstens etwa
30 fünfmal so groß wie die Höhe (h1) der Erhebungen ist.
28. Halbleiterchip nach Anspruch 27,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
35 die Zellengröße (d) der Erhebungen höchstens etwa dreimal
so groß wie die Höhe (h1) der Erhebungen ist.

29. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 19 bis 28,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die mit der ersten Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12) gekoppelte Schicht bzw. Grenzfläche einen Refle-
xionsgrad von mindestens 70% aufweist.
30. Halbleiterchip nach Anspruch 29,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die mit der ersten Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12) gekoppelte Schicht bzw. Grenzfläche einen Refle-
xionsgrad von mindestens 85% aufweist.
31. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 19 bis 30,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die reflektierende Schicht (28) auf einem Trägersubstrat (30) aufgebracht bzw. die reflektierende Grenzfläche durch ein Trägersubstrat (30) gebildet ist.
32. Halbleiterchip nach Anspruch 31,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die reflektierende Schicht bzw. das Trägersubstrat zugleich als Kontaktschicht des Halbleiterchips dient.
33. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 19 bis 32,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
auf der zweiten Hauptfläche (18) der Mehrschichtstruktur (12) eine transparente Schutzschicht aufgebracht ist.
34. Strahlungsemittierender Dünnschicht-Halbleiterchip mit
einer epitaktischen Mehrschichtstruktur (12), die eine aktive, strahlungserzeugende Schicht (14) enthält und eine erste Hauptfläche (16) und eine der ersten Hauptfläche abgewandte zweite Hauptfläche (18) zum Auskoppeln der in der aktiven, strahlungserzeugenden Schicht erzeugten Strahlung aufweist,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass
die erste Hauptfläche (16) der Mehrschichtstruktur (12)

mit einer reflektierenden Schicht bzw. Grenzfläche gekoppelt ist, und auf der zweiten Hauptfläche (18) der Mehrschichtstruktur (12) eine ein- oder zweidimensional strukturierte Vergütungsschicht (32,38) angeordnet ist.

5

35. Halbleiterchip nach Anspruch 34,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Vergütungsschicht (32,38) konvexe Erhebungen (36)
aufweist.

10

36. Halbleiterchip nach Anspruch 34 oder 35,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Vergütungsschicht (32,38) transparent und leitfähig
ist.

15

37. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 34 bis 36,
dadurch gekennzeichnet, dass
zwischen der Vergütungsschicht (32,38) und der Mehr-
schichtstruktur (12) eine Metallschicht angeordnet ist.

20

38. Halbleiterchip nach Anspruch 37,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Metallschicht sehr dünn oder nicht geschlossen, ins-
besondere netz- oder inselartig ausgebildet ist.

25

39. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 34 bis 38,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Erhebungen (26) die Form von Pyramiden, Pyramiden-
stümpfen, Kegeln oder Kegelstümpfen bzw. eine trapezoide
Querschnittsform oder eine dreieckige Querschnittsform
oder eine Kreissegment-Querschnittsform aufweisen.

30

40. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 34 bis 39,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Vergütungsschicht (32,38) netz- oder inselartig aus-
gebildet ist.

35

41. Halbleiterchip nach einem der Ansprüche 1 bis 40,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Mehrschichtstruktur (12) ein Material oder mehrere
verschiedene Materialien auf GaN-Basis enthält.

1/5

FIG 1

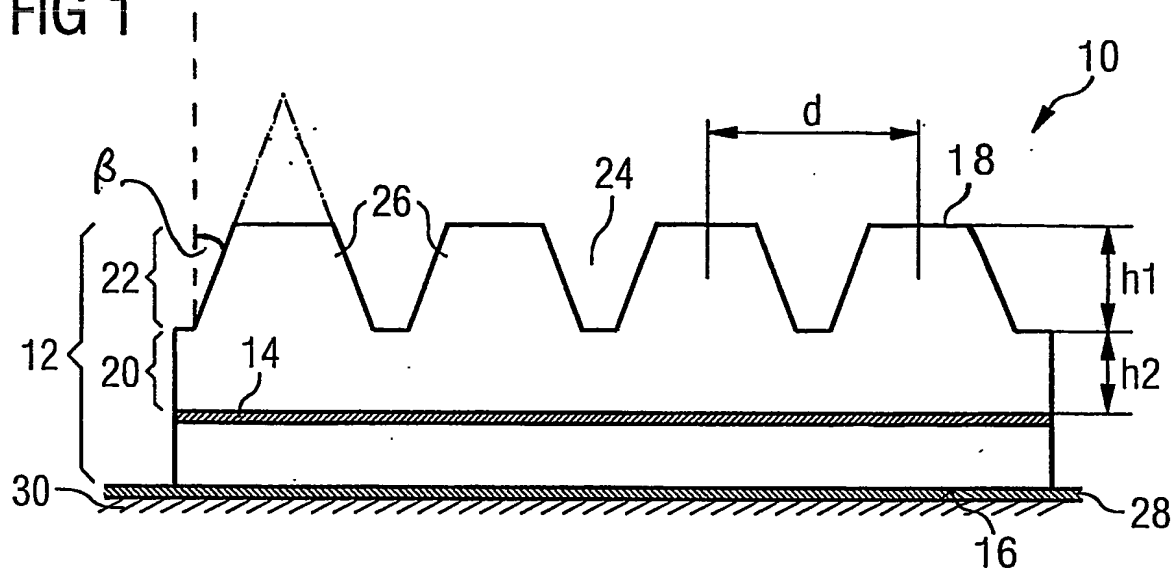


FIG 2A

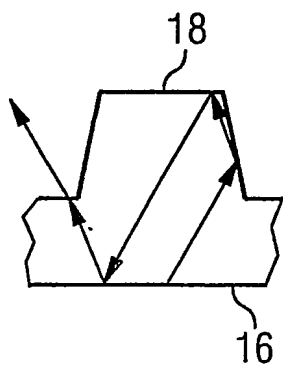


FIG 2B

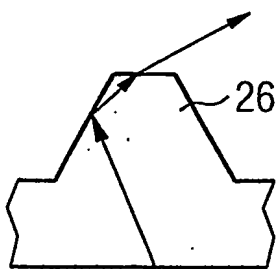


FIG 2C



2/5

FIG 3A

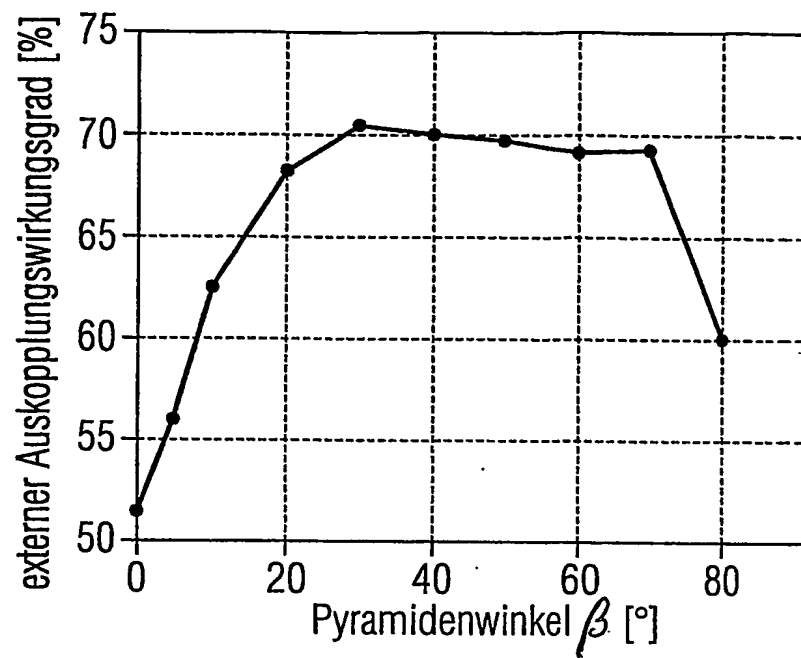
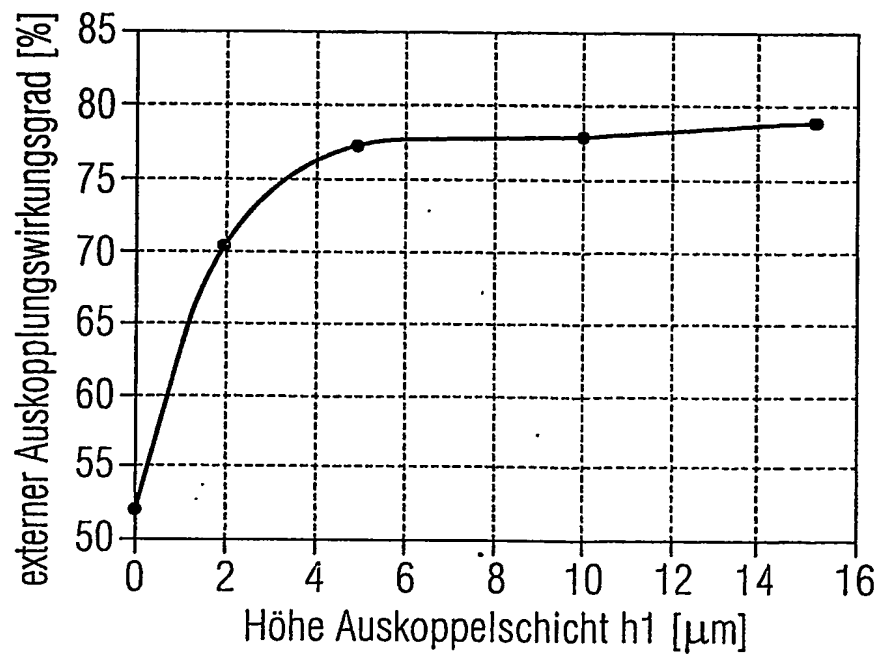


FIG 3B



3/5

FIG 3C

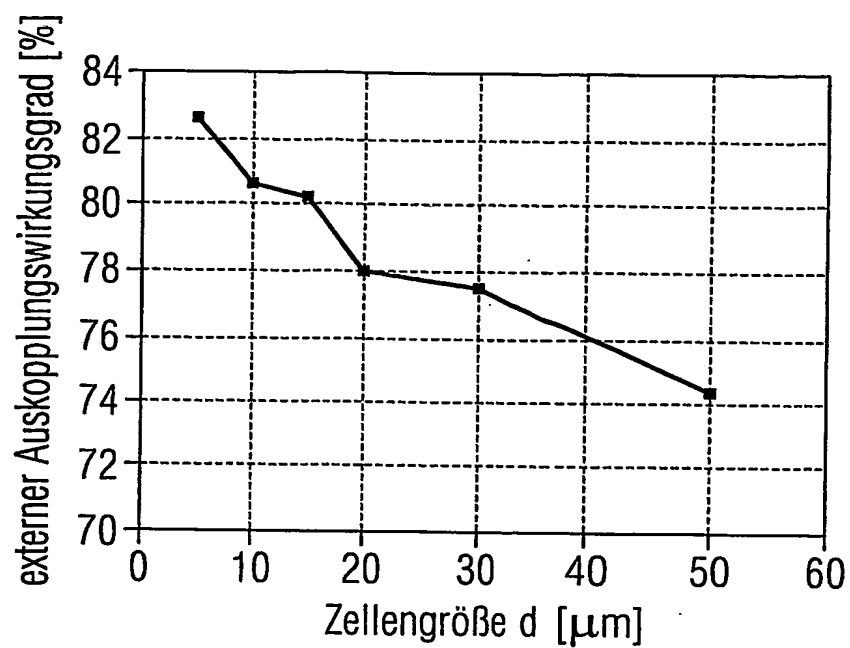


FIG 3D

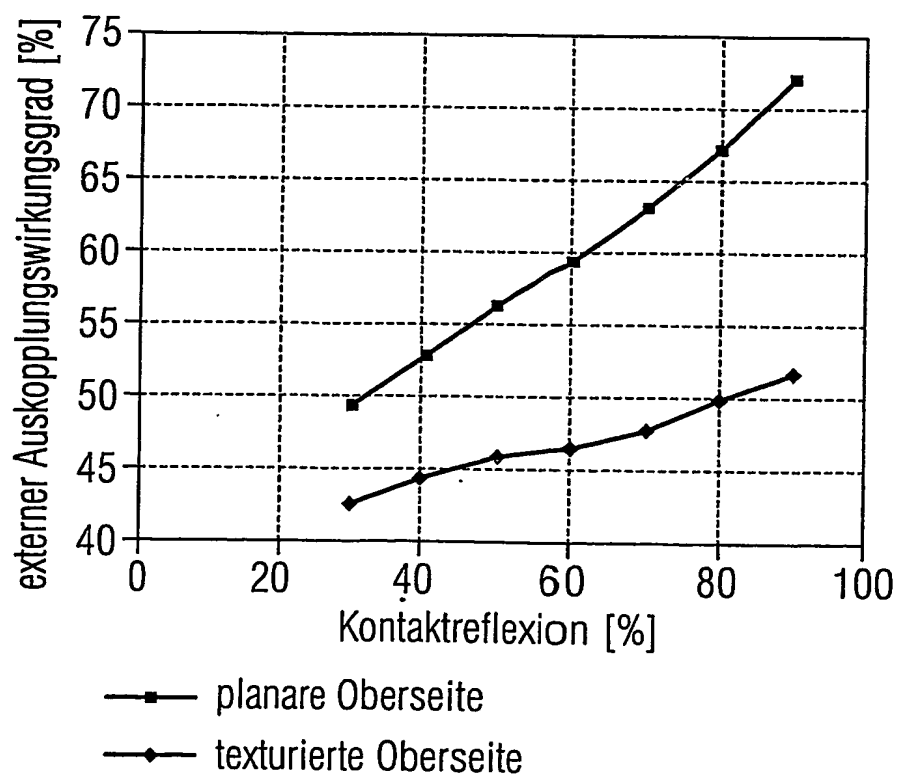


FIG 3E

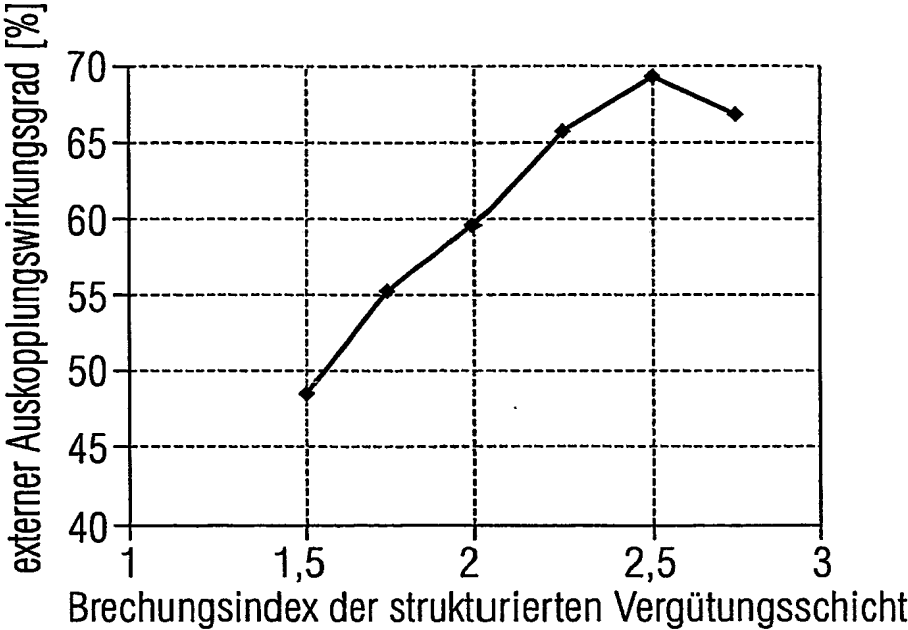


FIG 4

